

VŠB Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Diagnostika částečných výbojů
kabelového vedení ČEZ
Diagnostics of partial discharges for
cable lines CEZ

2012

Josef Růžička

Zadání bakalářské práce

Student:

Josef Růžička

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Diagnostika částečných výbojů kabelového vedení ČEZ
Diagnostics of Partial Discharges for Cable Lines CEZ

Zásady pro vypracování:

1. Současný stav diagnostické techniky elektrických izolačních systémů.
2. Popis degračních procesů v izolaci vysokonapětových kabelů.
3. Měření částečných výbojů v izolaci kabelů.

Seznam doporučené odborné literatury:

MACH, Věslav.: *Technika vysokého napětí*. Ostrava: Skriptum 2. přepracované vydání, ES VŠB-TUO, 2006, 114 s. ISBN 80-248-1161-8


ZÁLIŠ, Karel: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha : ACADEMIA, 2006. 135 s. ISBN 80-200-1358-X

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

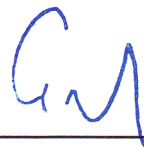
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

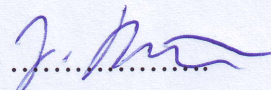



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení studenta/ky

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne : 4. 5. 2012

Podpis studenta/ky : 

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi, VŠB-Technická univerzita Ostrava, dále panu Ing. Petru Medkovi a také panu Romanu Kostelníkovi, oddělení Diagnostika kabelů, ČEZ Distribuční služby s.r.o, za odborné rady při zpracování této bakalářské práce a poskytnuté literární prameny.

Abstrakt

Tato bakalářská práce obsahuje obecný pohled na elektrotechnologickou diagnostiku izolačních systémů se zaměřením především na využití měření částečných výbojů uvnitř vn kabelů. Definuje základní pojmy, používané metody a jimi získané diagnostické veličiny k vyhodnocení izolačního stavu. Dále je podrobněji rozebrána podstata částečných výbojů, jejich druhy a vlastnosti. Celá jedna kapitola je pak věnována degradačním účinkům působících na izolační systém vn kabelů, kde hrají zásadní roli částečné výboje. Poslední kapitola je zaměřena na vlastní měření částečných výbojů, metody a jejich výhody a nevýhody. Díky spolupráci s diagnostickým oddělením, ČEZ Distribuční služby, se zde můžete seznámit se současným měřicím vozem, kde nechybí nejmodernější diagnostické zařízení OWTS využívající částečné výboje.

Klíčová slova: technická diagnostika, napěťové zkoušky, izolační systém, vysokonapěťový kabel, částečné výboje, elektrický stromeček, vodní stromeček, OWTS, měřicí vůz

Abstract

This thesis contains a general view of the electronic technological diagnosis of insulation systems, focusing primarily on the use of measurement of partial discharges inside HV cables. It defines basic concepts, methods used, and the diagnostic values obtained to evaluate the insulation condition. Furthermore, nature of partial discharges is discussed, their types and characteristics. An entire chapter is devoted to the degradation effects influencing the insulation system of HV cables, where the main part is represented by partial discharges. The last chapter focuses on the measurement of partial discharges, methods, and their advantages and disadvantages. Thanks to the cooperation with the diagnostic department of the ČEZ distribution company, you can learn about the current measuring car, featuring the latest diagnostic equipment called OWTS using the partial discharges.

Keywords: technique diagnostic, stress tests, insulation system, high voltage cable, partial discharges, electric tree, water tree, OWTS, measuring vehicle

Seznam použitých symbolů a zkratek

C (F)	elektrická kapacita (základní jednotka farad)
ČR	Česká republika
d (m)	tloušťka izolantu (základní jednotka metr)
EPR	etylen propylen rubber – izolační materiál
E_p (V/m)	elektrická pevnost (základní jednotka volt na metr)
I (A)	elektrický proud (základní jednotka ampér)
L (H)	indukčnost (základní jednotka henry)
n	četnost impulzů
OWTS	oscillating wave test system – diagnostický systém, který detekuje, pomocí oscilační napěťové vlny ve vn kabelech, úroveň částečných výbojů
P (W)	elektrický výkon (základní jednotka watt)
PE	polyetylen – izolační materiál
PILC	paper insulated lead covered cable – obchodní označení kabelu s papírovou izolací
PVC	polyvinyl chlorid – izolační materiál
Q (C)	součtový elektrický náboj (základní jednotka coulomb)
q (C)	zdánlivý náboj (základní jednotka coulomb)
R (Ω)	elektrický odpor (základní jednotka ohm)
RRK	redukovaná resorpční křivka
T (s)	časová perioda (základní jednotka sekunda)
$\text{tg}\delta$	ztrátový činitel
U (V)	elektrické napětí (základní jednotka volt)
U_o (V)	provozní elektrické napětí (základní jednotka volt)
U_p (V)	průrazné elektrické napětí (základní jednotka volt)
VLF	very low frequency – velmi nízká frekvence
vn	vysoké napětí
XLPE	zesíťovaný polyetylén – izolační materiál
x	souřadnice x v kartézském souřadnicovém systému
y	souřadnice y v kartézském souřadnicovém systému

Obsah

Úvod.....	8
1. Technická diagnostika.....	9
1.1 Diagnostické metody izolačních systémů.....	11
1.1.1 Stejnosměrná měření.....	11
1.1.2 Střídavá můstková měření.....	13
1.2 Diagnostika částečných výbojů.....	13
1.2.1 Charakteristické veličiny částečných výbojů.....	14
1.2.2 Druhy částečných výbojů.....	16
1.2.3 Typy částečných výbojů.....	16
1.3 Druhy vn kabelů.....	22
1.3.1 Kabel s izolací papír olej.....	22
1.3.2 Kabel s PVC izolací.....	23
1.3.3 Kabel s PE a XLPE izolací.....	23
2. Degradační procesy izolace vn kabelů.....	25
2.1 Vliv částečných výbojů na izolaci.....	25
2.2 Elektrický stromeček.....	26
2.3 Vodní stromeček.....	27
3. Měření částečných výbojů.....	28
3.1 Elektrické metody.....	28
3.1.1 Přímé metody galvanická metoda.....	28
3.1.2 Metoda oscilačním napětím OWTS.....	29
3.1.3 Nepřímé metody – kapacitní snímač.....	31
3.2 Neelektrické metody.....	32
3.2.1 Optické měření.....	32
3.2.2 Akustické měření.....	32
3.2.3 Chemické měření.....	32
3.3 Praktické měření s měřicím vozem.....	33
3.3.1 Měřicí vůz.....	33
3.3.2 Diagnostika kabelových vedení vn – cizí zavinění poruchy.....	33
Závěr.....	38
Seznam použité literatury.....	39

Úvod

Účelem této bakalářské práce je čtenáře seznámit s problematikou týkající se diagnostiky izolačních systémů vn kabelů s využitím znalostí o částečných výbojích. Tato diagnostická metoda dnes již patří k nejmodernějším způsobům jak včas odhalit nevyhovující část vn kabelového úseku a zabránit tak poruše v provozu. Aby člověk mohl po přečtení této práce ocenit výhody této nejmodernější metody, musí se nejdříve seznámit i s ostatními diagnostickými metodami. Obecný přehled používaných metod a vysvětlení základních pojmů v oblasti diagnostiky izolačních systémů je shrnut v kapitole 1 (Diagnostická technika). Mimo jiné je zde i uveden přehled používaných izolačních materiálů pro vn kabely s ukázkami používaných vn kabelů v praxi. Pro úspěšnou diagnostiku je také mnohdy zapotřebí vědět co vlastně měříme, aby nedošlo ke špatné interpretaci naměřených výsledků z důvodu nedostatečné znalosti měřené veličiny. V našem případě jsou to právě zmiňované parametry částečných výbojů, které jsme v dnešní době schopni díky moderní technice naměřit a na jejich základě vyvodit závěry. O podstatě částečných výbojů, jejich druhy a vlastnosti pojednává podkapitola 1.2 (Diagnostika částečných výbojů). Proč je znalost částečných výbojů tak důležitá právě v oblasti izolačních systémů je evidentní z kapitoly 2 (Degradací procesy vn kabelů). Tato kapitola pak popisuje jednotlivé negativní účinky výbojů na izolaci a zvláštní jevy jako je elektrický stromeček či vodní stromeček. Všechny tyto jevy a mnoho dalších i neelektrických jako je mechanické namáhání atd. vede k tzv. stárnutí izolace. Stárnutí používáme jako všeobecný název pro zhoršující se vlastnosti izolačních systémů v závislosti na čase. Vn kabely s izolací papír olej se již začali používat po druhé sv. válce a některé úseky jsou tedy více než 50 let staré. V průběhu let docházelo k revoluci izolačních materiálů v podobě plastických hmot, které se dnes v nejrůznějších modifikacích používají a vlastnosti se stále vylepšují. Je tedy pochopitelné, že se diagnostika musí více zabývat staršími úseky, které v průběhu let prodělaly už několik oprav a pospojování. Právě zmiňované pospojování s nejrůznějšími typy spojek patří k nejčastějším lokalizovaným poruchám. V poslední kapitole 3 (Měření částečných výbojů) je pak přehled nejpoužívanějších metod a jejich principy měření částečných výbojů. Je zde podrobně popsána metoda OWTS s praktickou ukázkou jak takové měření probíhá v praxi při běžné diagnostice pomocí měřicího vozu společnosti ČEZ.

Proč je vlastně diagnostika vn kabelů tak důležitá už vyplívá ze samotné podstaty důležitosti kabelového vedení. Napěťová hladina vn se používá pro přenos el. energie v distribučních sítích (lokální i regionální), kde tento přenos zajišťují právě kabelové vedení. Porucha takového vedení je vždy nepříjemná a většinou vede k obrovským ekonomickým ztrátám. Je proto prioritou každého provozovatele distribuční sítě zajistit, aby nedocházelo k nečekaným poruchám a tedy odhalit vadný úsek dříve než způsobí mnohem větší škody. Kromě preventivní diagnostiky kabelového vedení je velice přínosná i diagnostika prováděná po opravě či při uvádění nového kabelového úseku do provozu. Po takové diagnostice vn kabelů, které vyhoví všem zkouškám, je pak zpravidla dána provozovateli garance na několik let (8 let v současnosti u distribučních služeb ČEZ).

1. Technická diagnostika

V současné době, kdy lidský život v podstatě závisí na el. energii si nemůžeme dovolit, abychom nevěděli v jakém stavu se nacházejí jednotlivá zařízení v elektrizační soustavě, neboť jakákoliv porucha stroje včetně kabelového vedení může vést k obrovským finančním ztrátám. Předějit takovým situacím, či minimalizovat ztráty, nám právě obstarává diagnostická technika. Ta s rozvojem elektroniky, obzvláště pak mikroprocesorové techniky, se stále více zdokonaluje, ať už v oblasti přesnosti vyhodnocení dat, tak ve snaze zmenšování hmotnosti, což vede k větší mobilitě diagnostických přístrojů. Obecná definice označuje diagnostiku jako proces zjišťování aktuálního stavu daného zařízení. V elektrotechnice pak jde samozřejmě o **elektrotechnologickou diagnostiku**. Tato bakalářská práce je zaměřena na diagnostiku izolačních soustav kabelového vedení vn a to především diagnostiku částečných výbojů. Tyto výboje mají v současné době při používání polyethylenových materiálů jako izolantu největší vliv na “stárnutí” izolace, proto je zde uveden jen přehled základních metod určování aktuálního stavu izolace podle [1] se stručným popisem a principem. O podrobnějším popisu diagnostických metod založené na činnosti částečných výbojů pojednává samostatná kapitola 3 (Měření částečných výbojů). Po shromáždění a uložení všech dat, které nám poskytla **provozní diagnostika**, můžeme poté vyhodnotit naměřené data a na základě **elektrotechnologické prognostiky** tak určit další vývoj daného zařízení a zabránit závčasnému poruše. Bohužel současná elektrotechnologická diagnostika a prognostika v oblasti izolačních systémů kabelového vedení vn není tak dokonalá, aby dokázala s přesností určit, zda degradační procesy uvnitř izolace jsou natolik vážné, že je třeba výměny či opravy. Mnohdy v praxi může daný úsek kabelového vedení, po detekování zvýšené výbojové činnosti, vydržet i několik let v provozu nebo naopak je jen otázka týdnů či měsíců, kdy dojde k proražení izolace. V současnosti je tak největší pozornost věnována ve vývoji stále dokonalejších diagnostických přístrojů a metod k určení stáří izolace.

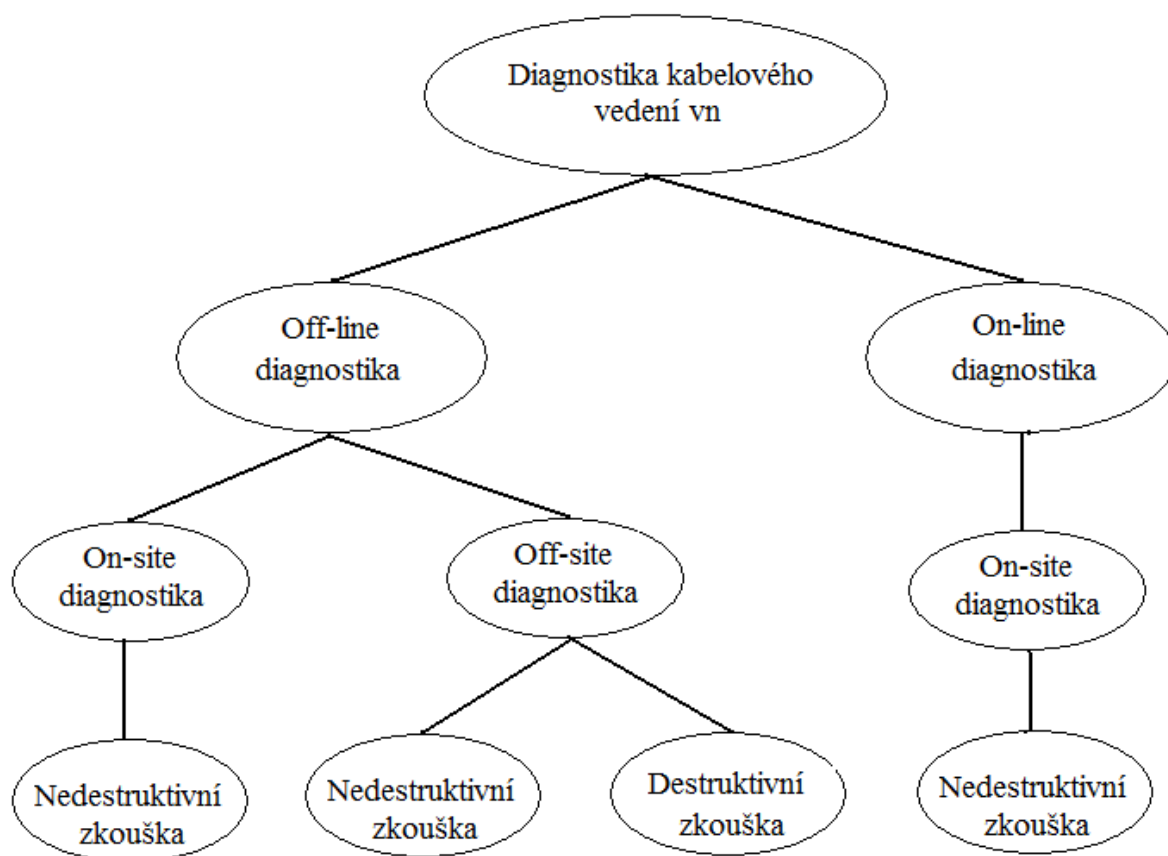
V následujícím textu se objevují dva nejdůležitější pojmy v oblasti diagnostiky a to tzv. **off line** a **on line diagnostika**. Jedná se o dva základní způsoby provádění diagnostiky. **Off line** nebo li též **testovací diagnostika** je prováděna mimo provoz diagnostikovaného objektu. V praxi si samozřejmě nemůžeme dovolit u nejdůležitějších el. zařízení jen tak je odpojit. Provedení takové diagnostiky by vedlo k velkým ekonomickým ztrátám, a proto zde provádíme **on line diagnostiku**, označovanou také jako **funkční diagnostiku**, za plného provozu. [1]

Při off line diagnostice kabelového vedení se nejčastěji setkáváme s přímou diagnostikou na místě pokládky vn kabelu a mluvíme o tzv. **on site** diagnostice. Je-li možno odebrat vzorek a podrobit ho zkouškám v laboratoři pak hovoříme o **off site** diagnostice.

Se způsoby provádění diagnostiky souvisejí další dva pojmy a tím jsou **destruktivní** a **nedestruktivní zkouška**. **Destruktivní zkouška** vede k nevratnému poškození testovaného objektu, ačkoliv je tato metoda dražší pro potřebu velkého počtu experimentálních vzorků, mají přesto výsledná naměřená data svojí nezastupitelnou důležitost.

Z výše uvedených pojmů se on line diagnostika jeví jako nejideálnější způsob, kde jsme z kontinuálního měření při dlouhém časovém intervalu schopni lépe analyzovat změny vlastností elektrického zařízení. V praxi vzhledem k délce kabelového vedení vn (desítky kilometrů) je tato metoda prakticky neproveditelná, jelikož by znamenala obrovský počet snímacích čidel a dalšího diagnostického zařízení. Proto se tato metoda uplatňuje jen v určitých místech kabelového vedení,

která jsou nejporuchovější. Jde zejména o kabelové koncovky a spojky. Obecně tedy nepoužívanější metodou pro kabelové vedení je off line diagnostika a to především on site diagnostika [8]. Dané vztahy mezi jednotlivými metodami jsou pro názornost graficky znázorněny *obr. 1*.



Obr. 1. Diagnostické metody.

1.1 Diagnostické metody izolačních systémů

Podle [1] můžeme určit izolační vlastnosti těmito způsoby:

Stejnoseměrná měření.
Střídavá můstková měření.
Pulzní a vysokofrekvenční měření.
Mechanická a akustická měření.
Zkoušky zvýšeným napětím, tzv. přepětíové zkoušky.
Tepelná a chemická měření.
Smyslová kontrola.

1.1.1 Stejnoseměrná měření

Tyto napětíové zkoušky jsou historicky nejstaršími a dodnes patří k nejdůležitějším v oblasti diagnostiky izolačních systémů. Výsledkem těchto měření je pak určení **zdánlivého izolačního odporu** R_{iz} , který je definován jako podíl přiloženého stejnosměrného napětí a aktuálního proudu, který protéká danou izolací.

$$R_{iz} = U / I \text{ (}\Omega \text{ V, A)} \quad (1)$$

Dále se z těchto měření určuje **polarizační index** a to především **jednominutový polarizační index** p_{i1} definován jako podíl izolačního odporu v šedesáté a patnácté sekundě po přiložení napětí. Či jako podíl absorpčních proudů v patnácté a šedesáté sekundě po přiložení napětí na zkoušený izolační materiál. Pokud je izolace navlhla nebo jinak znečištěná blíží se hodnota polarizačního indexu jedné a většinou je tato izolace již nevhodná. Naopak u suché izolace je hodnota p_{i1} větší.

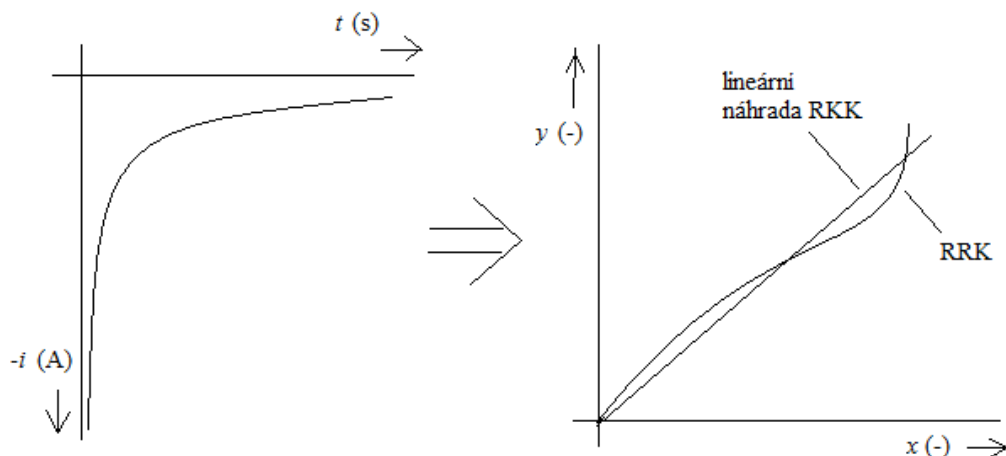
$$P_{i1} = R_{60} / R_{15} = i_{15} / i_{60} \text{ (} \Omega, \Omega; \text{ A, A)} \quad (2)$$

Krom absorpčního proudu můžeme také využít resorpčního proudu k sestrojení tzv. **redukovaných resorpčních křivek** viz obr.2. Účelem této metody je převést průběh resorpčních proudů vhodnou transformací do tzv. tvaru relativních resorpčních charakteristik, kde okamžitá hodnota proudu v čase t se vyjádří jako podíl k proudu v 15 té vteřině [7]. Pro transformaci souřadnic platí:

$$x = \ln(t) - \ln(15) \quad (3)$$

$$y = ABS [(\ln(i_t) - \ln(i_{15}))] \quad (4)$$

Po linearizaci RRR nám pak směrnice dané přímky slouží jako ukazatel hodnocení izolačního systému. Větší směrnice vypovídá o lepších izolačních vlastnostech daného izolantu a menší směrnice pak ukazuje na zhoršené izolační vlastnosti.



Obr.2. Metoda RRK.[7]

Jedním nejdůležitějším parametrem pro izolační systémy je jejich **elektrická pevnost**, neboť tento parametr je rozhodující pro jejich celkový návrh v elektrických zařízeních. Je definována jako podíl průrazného napětí U_p a tloušťky daného izolantu d v místě elektrického průrazu.

$$E_p = U_p/d \text{ (V.m}^{-1} \text{ V, m)}, \quad (5)$$

hodnotu průrazného napětí U_p nejrozumnějších izolačních materiálů nám zjišťují **zkoušky průrazným stejnosměrným napětím**, kde postupně zvyšujeme hladinu napětí až do přeskoku.

Se stejnosměrným měřením souvisejí i tzv. **zkoušky výdržným napětím**. Aby se zabránilo vzniku přepětí při spínacích přechodových jevů začíná se na nízké hodnotě. Rychlost zvyšování napětí bývá 2% zkušebního napětí U za sekundu, aby se zabránilo zbytečnému namáhání zkušebního objektu a přitom aby bylo možno odečtení hodnot z měřících přístrojů. Konečné zkušební napětí se pak určitou dobu ještě drží dle norem a celá tato zkouška by pak neměla přesáhnout 60 s. Pokud nedojde během zkoušky k přeskoku napětí na daném objektu, můžeme považovat zkoušku za úspěšnou.

1.1.2 Střídavá můstková měření

Tato měření nám pomáhají získat další důležité parametry izolačních systémů k nimž patří především **ztrátový činitel $\tan \delta$** . Jde o tangens úhlu, který svírá fázor proudu protékající daným izolantem a přiloženým napětím. Nebo-li můžeme říct, že tato hodnota udává jak moc se liší skutečný izolant od ideálního. V praxi patří mezi nejdůležitější parametry pro vyhodnocení izolačního stavu kabelového vedení. Existuje řada metod pro vyhodnocení tohoto parametru, nejpoužívanějším je **zapojení Scheringova můstku**. Skládá se z části vysokonapěťové, kde se nachází zkoušený objekt a kapacitní normál, a z části vyvažující dané můstkové zapojení. K vyvažování se používá kapacitní C_4 a odporová R_3 dekáda. Diagonálu můstku poté tvoří indikátor signalizující vyvážení. Pro vyvážení můstku musí platit:

$$C_x = C_n \cdot (R_4/R_3) \quad (F, F, \Omega, \Omega) \quad (6)$$

Ztrátový činitel poté dostaneme ze vztahu:

$$\tan \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 \quad (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, F, \Omega) \quad (7)$$

Pro přesnější měření a zvýšení citlivosti se dá použít **metoda čtyřkapacitního můstku**, kterou tvoří také Scheringův můstek, který je ale tvořen ve všech větvích jen kapacitami. Ve větvích je tak větší impedance než u klasického Scheringova můstku, což nám celkově zvyšuje citlivost a přesnost měření. Pro zamezení vyšších harmonických má můstek svůj vlastní napájecí zdroj, který pracuje v rezonančním zapojení. Celý můstek je pak stíněn pro potlačení parazitních kapacit např. přívodů, které mohou způsobit nepřesnosti měření. [7]

Stejně jak u stejnosměrného napětí i zde se používají tzv. **zkoušky výdržným napětím** a **zkoušky průrazným napětím**.

1.2 Diagnostika částečných výbojů

Měření částečných výbojů se poslední dobou stává neodmyslitelnou součástí všech diagnostických metod pro zjištění stavu izolace. A proto stále více výzkumných institucí se věnuje teorii částečných výbojů a jejich negativnímu vlivu na izolaci viz. kapitola 2.

Celkové vlastní poznatky o významu částečných výbojů v technické diagnostice vn kabelů mohou shrnout v následujících řádcích.

Ze všech metod diagnostiky izolačního stavu vn kabelů, včetně příslušných spojek a koncovek, je v současnosti metoda založená na detekci částečných výbojů ta nejpoužívanější. Tato metoda se stala neodmyslitelnou součástí všech moderních měřících vozů patřících společnosti ČEZ Distribuční služby, s.r.o. Zejména systém OWTS se používá již od roku 1998 a jako první byl využíván v Severomoravském regionu. Po pozitivních zkušenostech s tímto systémem se rozšířil po celé ČR.

Výhody diagnostiky izolačních systémů pomocí detekce částečných výbojů jsou následující:

nedestruktivní zkouška
některé metody lze zařadit do on line diagnostiky
snadná obsluha a rychlé vyhodnocení naměřených dat
mobilní měřicí zařízení, existují i ruční přenosné přístroje s vlastním zdrojem
lokalizační metody umožňující najít přesné místo zhoršených izolačních vlastností a poruchy
předcházení závažnějších poruch včasným odhalením tzv. elektrických stromečků
jediná metoda jak odhalit dutinky v celoplastových izolačních systémech

Samozřejmostí jsou i nevýhody:

částečné výboje nevznikají v dutinkách vyplněné vodou a tak nelze odhalit vodní stromečky
firmy vyrábějící dané diagnostické přístroje jsou převážně ze zahraničí a tak většinou teorie a návody jsou v cizím jazyce.

S jasnou převahou výhod oproti nevýhodám se i do budoucna jeví tyto metody jako nejeefektivnější nástroj pro vyhodnocení životnosti vn kabelu či včasnému předejetí větším škodám při průrazu elektrické izolace.

1.2.1 Charakteristické veličiny částečných výbojů

Pro každé měření a jeho vyhodnocení je důležité zvolit vhodnou charakteristickou veličinu. Z naměřených popřípadě odvozených veličin pak můžeme vyhodnotit aktivitu částečných výbojů. První skupinou veličin jsou **veličiny vztažené k jednotlivým impulzům**, které jsou důsledkem aktivity částečných výbojů, K těmto veličinám patří:

Zdánlivý náboj q .

Tato veličina patří mezi základní diagnostické parametry pro vyhodnocování aktivity částečných výbojů. Jde o velmi malé hodnoty a proto základní jednotkou jsou pikocoulomby (pC). Nejde ovšem o skutečnou velikost náboje výboje, jelikož částečný výboj vzniká jen v dutince uvnitř izolantu, kterou si lze představit jako určitou kapacitu. Celková kapacita mezi elektrodami je však tvořena ještě zbývající částí izolantu kolem dutinky a proto lze určit pouze zdánlivý náboj.

Fázový úhel φ_i a čas t_i výskytu impulzu.

Mezi fázovým úhlem a časem platí vztah:

$$\varphi_i = 360 \cdot \left(\frac{t_i}{T} \right) (^{\circ}, s), \quad (8)$$

kde t_i je okamžitý čas výskytu částečného výboje od doby předcházejícího kladného průchodu napětí nulou a T je doba periody napětí.

Četnost impulzů n .

Střední hodnotu počtu proudových impulzů generovaných výbojovou činností, které jsou v praxi dány určitou minimální měřitelnou hodnotou v určitém časovém intervalu nazýváme četnost impulzů částečných výbojů. Tato veličina je vyjádřena v impulzech za sekundu.

Jelikož právě častý lokální výskyt aktivity částečných výbojů vede k degradaci izolačního materiálu byly zavedeny tzv. **integrované veličiny**. Tyto veličiny jsou získány z veličin vztaženými k jednotlivým impulzům jejich sumarizací za určitý časový interval. Tento interval je mnohem větší než doba periody testovacího napětí, nejčastěji 60 s.

Součtový náboj Q .

Sečteme-li hodnoty zdánlivých nábojů za určitý časový interval, nejčastěji za půlperiodu testovacího napětí, dostaneme součtový náboj Q . Udává se v základních jednotkách C, popřípadě pC.

Střední proud částečných výbojů I .

Tento diagnostický parametr získáme součtem absolutních hodnot zdánlivých nábojů za daný časový interval T a následně podělením touto dobou:

$$I = \frac{1}{T} \cdot (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_m|) \quad (\text{A nebo C.s}^{-1}) \quad (9)$$

Výkon částečných výbojů P .

$$P = \frac{1}{T} \cdot (q_1 \cdot u_1 + q_2 \cdot u_2 + \dots + q_m \cdot u_m) \quad (\text{W}) \quad (10)$$

1.2.2 Druhy částečných výbojů

Jde v podstatě o samostatné výboje v plynech (Townsendova podmínka vzniku samostatného výboje [2]), které se zde můžou objevit při určité hodnotě elektrického napětí, mluvíme o tzv. zapalovacím napětí. Na kabelovém vedení vysokého napětí a v částech elektrických zařízení, které pracují s vysokým napětím, jsou tedy tyto částečné výboje velice častým jevem. Jak již z názvu vyplývá, v technice vysokého napětí jde o tzv. neúplný přeskok napětíově namáhané izolace, kde tedy výboj nastane jen v určité části a není tedy celá izolace proražena. Jak již ale bude zmíněno dále, časem tyto částečné výboje uvnitř izolace můžou být nakonec příčinou el. průrazu izolace. Dle charakteru a místa vzniku takového částečného výboje rozlišujeme:

Vnější částečné výboje

Tento druh částečného výboje vzniká v plynech v okolí elektrod určitých malých poloměrů či zakřivení. Obecně se tento neúplný samostatný výboj nazývá též **koróna**. Jelikož nejčastěji vzniká na hranách elektrod v plynném prostředí nemá tedy trvalé destruktivní účinky na kabelovou izolaci vysokonapětového vedení. Často jsou tyto výboje pozorovatelné pouhým okem a pro detekci na různých elektrických zařízeních jako například odpojovačích se používají různě citlivé kamerové systémy. Vlivem ionizace vzduchu vzniká ozón, který způsobuje korozi zařízení, či je zdrojem elektromagnetického záření. Také ztráty na vedení způsobené vznikem koróny nejsou zanedbatelné, tento problém se však snadno minimalizuje použitím svazkového vodiče, kde se zvýší záměrně počáteční napětí koróny při zachování průřezu vodiče. Avšak nejen negativní účinky má tento druh výboje, například se využívá v ionizátorech, v elektrostatických odlučovačích apod. [2]

Povrchové částečné výboje

Tento výboj vzniká v časově proměnném poli elektrody na rozhraní pevného a plynného izolantu se šikmým vstupem siločar po překročení určitého počátečního napětí [2]. Též se takovému výboji říká klouzavý, jelikož jeho charakter šíření po povrchu izolantu připomíná právě klouzavý pohyb. Stejně jako koróna má nepříznivé účinky, zejména pak v místech průchodek a koncovek kabelového vedení, kde se často pro zamezení vzniku nanáší ochranný povlak či se zakřívují elektrody.

Vnitřní částečné výboje

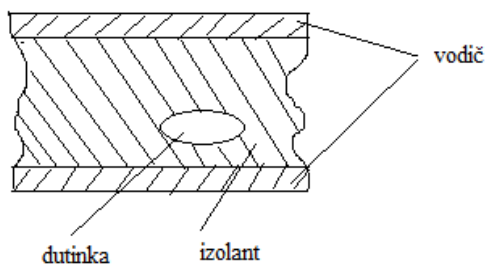
Tímto pojmem máme namysli neúplné samostatné výboje vznikající v plynném prostředí, které se nachází v pevném popřípadě kapalném izolantu. Typickým příkladem jsou dutinky uvnitř polyethylenové izolace, které bohužel nejsme schopni žádnou dosavadní výrobní technologií eliminovat. Právě tyto výboje mají největší vliv na "stárnutí" kabelové izolace vedení vysokého napětí. Obvykle se částečnými výboji rozumí právě tyto vnitřní, avšak pro dodržení správné technické terminologie budou v následujícím textu a kapitolách vždy rozlišeny jednotlivé druhy částečných výbojů dle [1]. Jelikož právě tyto vnitřní částečné výboje mají takové destruktivní účinky na izolaci, jsou tyto degradační procesy detailněji popsány v samostatné kapitole 2.

1.2.3 Typy částečných výbojů

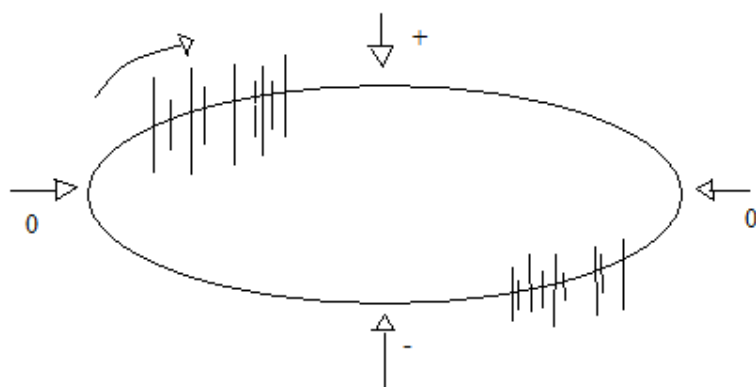
Krom rozlišování základních druhů můžeme dle fázového úhlu částečných výbojů také rozlišovat různé typy částečných výbojů. Pro každý typ je pak charakteristické místo výskytu a povaha výbojové činnosti. Pro vyhodnocení se používají tzv. Lissajousovy obrazce, které na osciloskopu jsou dány superpozicí sinusového napájecího napětí a daných proudových impulzů způsobených výbojovou činností. [1]

Typ A:

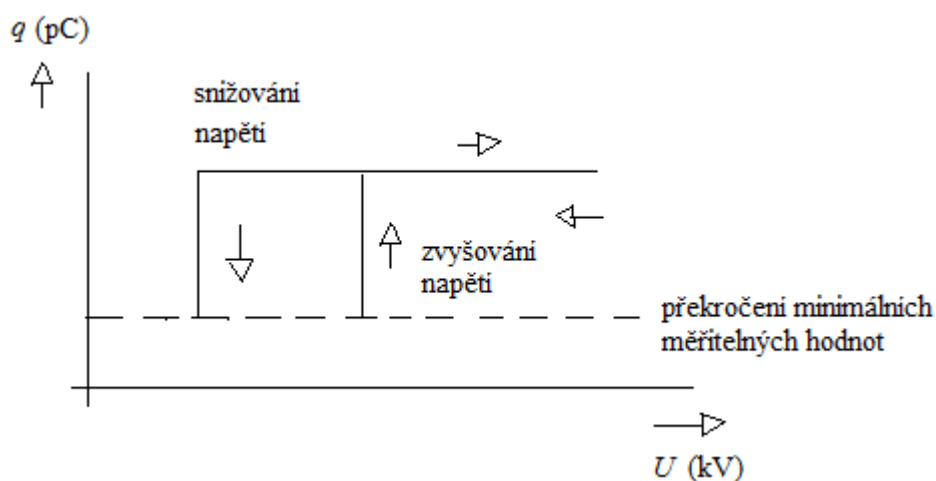
Jedná se o vnitřní částečné výboje, vznikají tedy ve vnitřní struktuře dielektrika ve vzduchových dutinkách viz. obr.2. Pro tento typ výboje je charakteristická jejich přibližně stejná velikost a stejný počet rozmístění jak v kladné tak i záporné půlce zkušební napětí mezi nulou a maximem. Jak je vidět na obr.3 v dalších periodách napětí se však dané impulzy vyskytují v náhodných polohách s různými velikostmi. Ze závislosti velikosti náboje na napětí obr. 3 můžeme říct, že po dosažení zapalovacího napětí prudce stoupne výbojová aktivita, která se již ale dále nijak nezvyšuje se zvyšujícím se napětím.



Obr.2. Výskyt částečných výbojů typu A.[1]



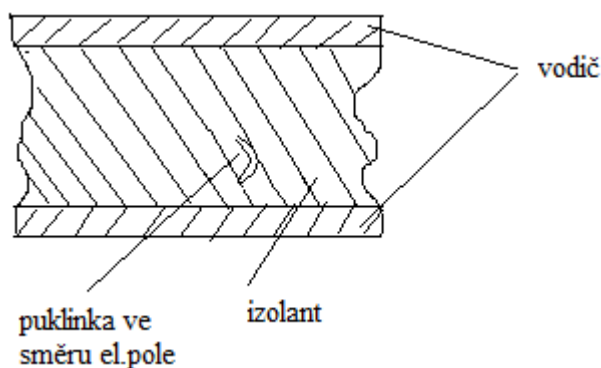
Obr.3. Lissajousův obrazec výbojů typu A.[1]



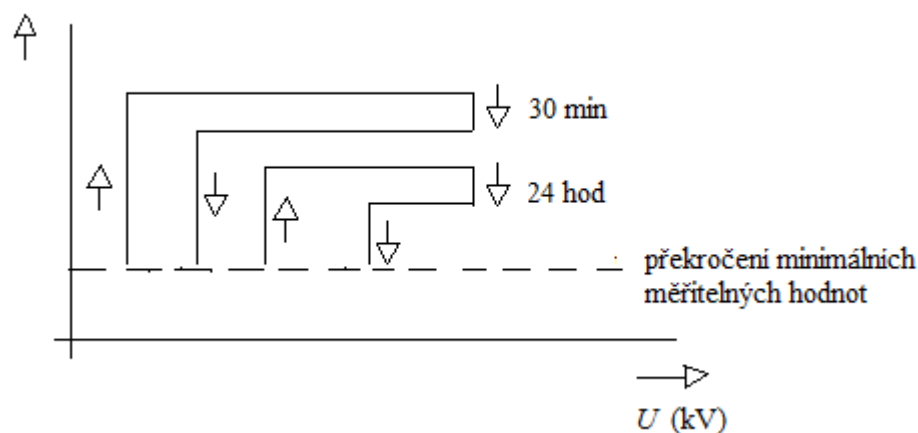
Obr.4. Závislost náboje na přiloženém napětí výbojů typu A.[1]

TYP B:

Tento typ výboje je typický pro termoplastickou izolaci obsahující nehomogenní vzduchové puklinky ve směru elektrického pole (obr. 4). Lissajousův obrazec těchto výbojů je shodný s typem A (obr. 2). Rozdílná je však jejich závislost velikosti náboje na napětí (obr. 5). Po zvýšení napětí na maximální možnou hodnotu, kdy ještě nedojde k průrazu izolantu a podržení tohoto napětí po dobu 30 min se začne projevovat tzv. samozhášecí jev, kdy začne klesat velikost náboje. Zhášecí napětí je pak mnohem vyšší než zapalovací. Po dalším znovu zvýšení napětí a udržení jej např. na 24 hodin se velikost náboje bude opět snižovat a zhášecí napětí se ještě více zvýší.



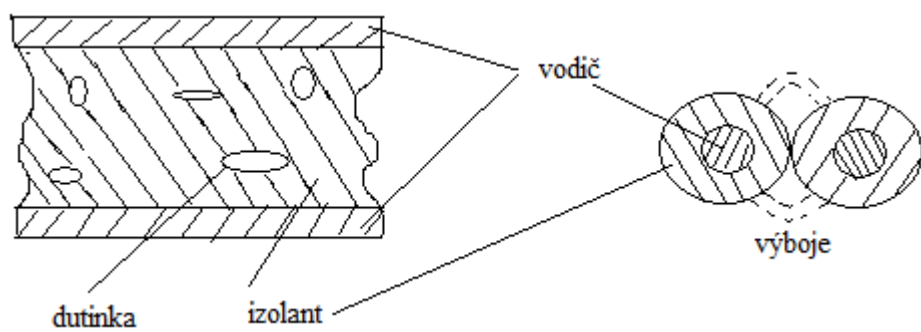
Obr. 4. Výskyt částečných výbojů typu B v termoplastické izolaci. [1]



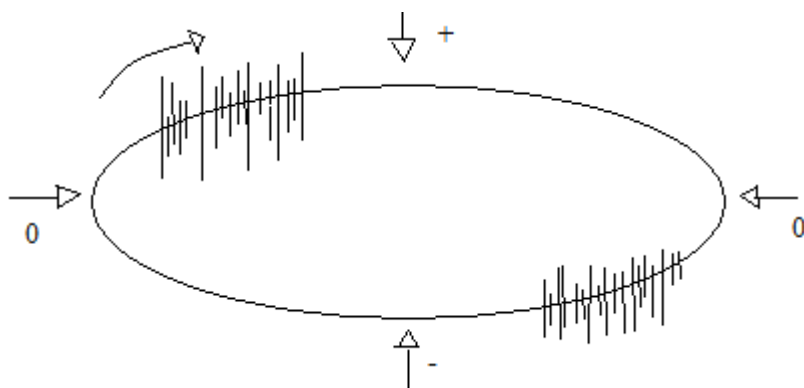
Obr. 5. Závislost náboje na přiloženém napětí výbojů typu B. [1]

TYP C:

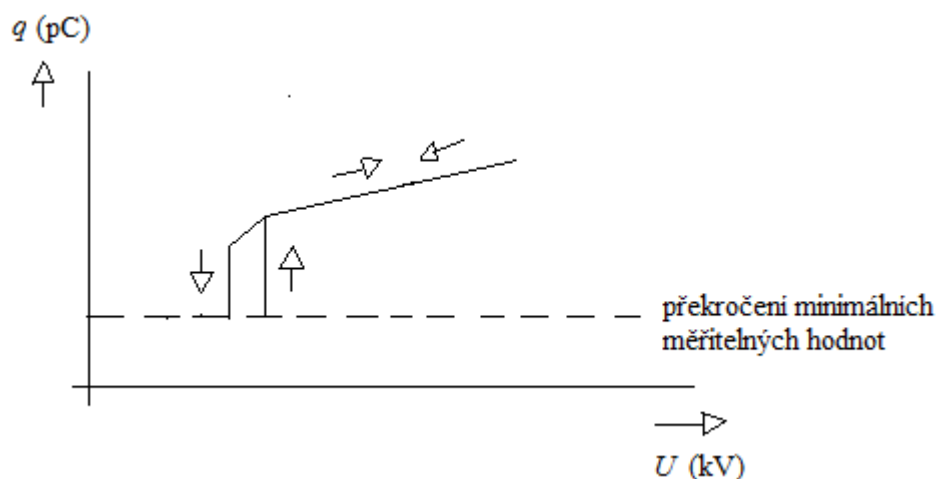
Vnitřní částečné výboje vyskytující se v izolantu o větším počtu dutinek, vnější částečné výboje vznikající na povrchu izolace dvou dotýkajících se vodičů, případně částečné výboje na povrchu izolace v místech vysokého napěťového gradientu označujeme jako výboje typu C (obr. 6). Na Lissajousovým obrazci těchto výbojů je vidět jejich větší hustota proudových impulsů superponovaných na zkušební napětí oproti typům A a B (obr. 7). Počet nábojů úměrně roste se zvyšujícím se napětím, kdy do určité hladiny napětí již nejsme schopni rozlišit jednotlivé výboje. Zhášecí napětí bývá o malinko menší než je zapalovací, popřípadě stejné (obr. 8).



Obr.6. Výskyt výbojů typu C v izolaci obsahující větší množství vzduchových dutinek (vlevo) a mezi dvěma dotýkajícíma se vodiči (vpravo).[1]



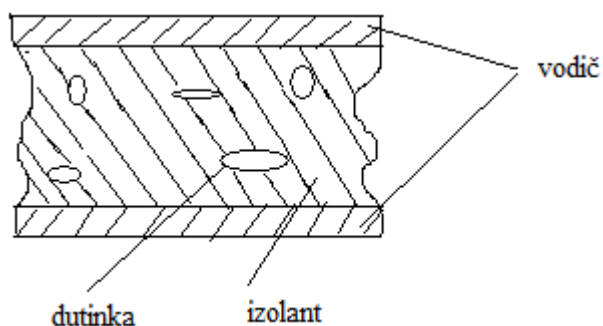
Obr.7. Lissajousův obrazec výbojů typu C. [1]



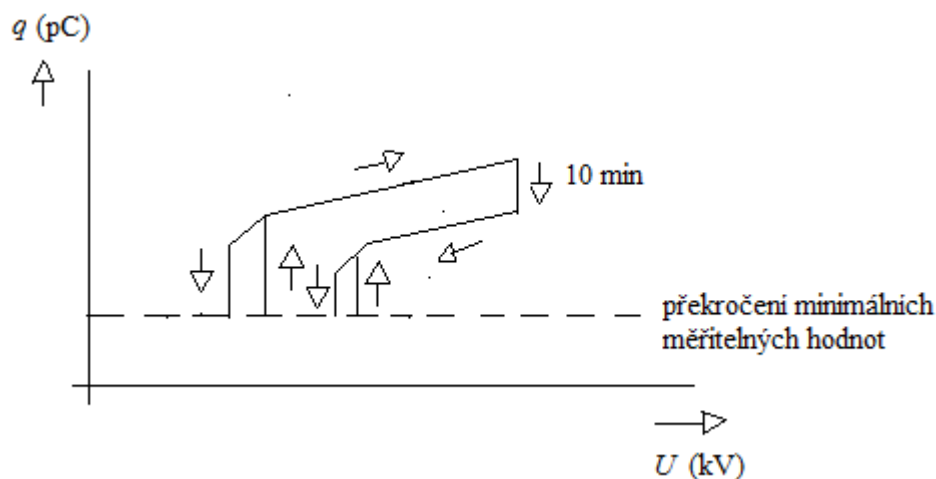
Obr.8. Závislost náboje na přiloženém napětí výbojů typu C. [1]

TYP D:

Tento typ výbojů je typický pro vnitřní částečné výboje v izolantech na bázi pryskyřice. Takové materiály už z technologické výroby obsahují plno dutinek (obr.9.). Jejich projev je podobný typu C (obr.7). Jejich samozhášecí schopnost stejně jako u typu B způsobí po přidržení napětí na konstantní hodnotě na delší dobu zvýšení zapalovacího i zhášecího napětí (obr.10).



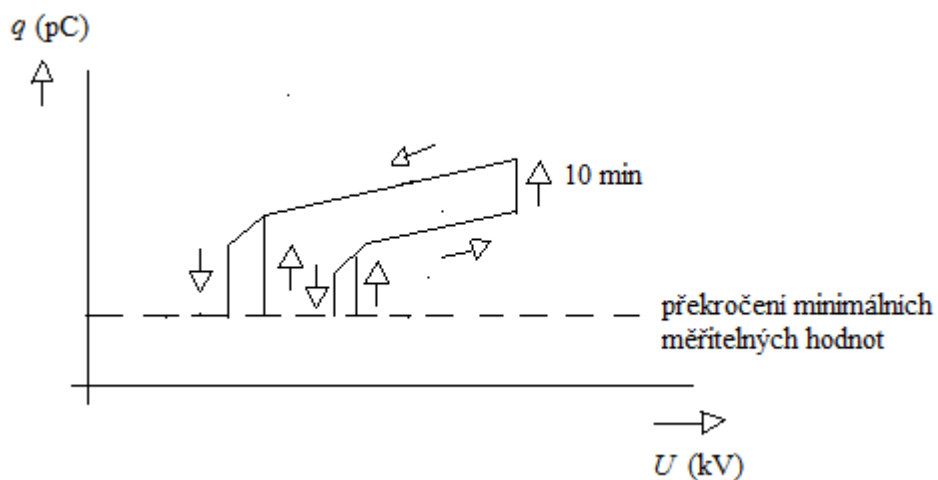
Obr.9. Výskyt výbojů typu D v izolantu z pryskyřice. [1]



Obr.10. Závislost náboje na přiloženém napětí výbojů typu D.[1]

TYP E:

Částečné výboje typu E se vyskytují v izolantech, které obsahují určitou laminární nehomogenitu. Projevy těchto výbojů znázorněné na osciloskopu jsou obdobné typům C nebo D. Po překročení zapalovacího napětí velikost náboje prudce vzroste a s dalším zvyšováním napětím úměrně roste. Přidržíme-li napětí na konstantní hodnotě po určitou dobu, např. 10 minut velikost náboje se sama zvýší a ustálí na nové hodnotě a pokud pak opět budeme snižovat napětí bude nakonec zhášecí napětí o mnoho menší než bylo původní zapalovací napětí (obr.11).



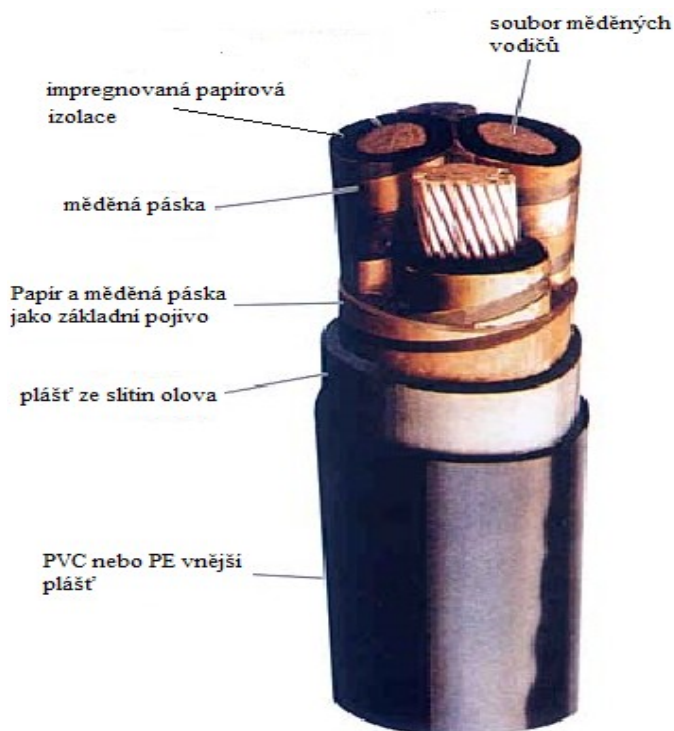
Obr.11. Závislost náboje na přiloženém napětí výbojů typu E.[1]

1.3 Druhy vn kabelů

Vn kabely slouží pro přenos a rozvod elektrické energie na napětových hladinách 3, 6, 10, 22 a 35 kV. Používají se převážně jako kabelová síť, která je právě tvořena vn kabely uloženými v zemi. Kromě kabelových sítí ve městech a obcích se také vn kabely používají jako venkovní vedení, kde nahrazují holé vodiče. Existuje nespočet druhů vn kabelů lišící se především druhem izolace, konstrukcí, počtem žil atd. Vzhledem k rozsahu a zaměření této bakalářské práce zde uvedu jen rozdělení dle druhu izolace.

1.3.1 Kabel s izolací papír olej

Tento druh vn kabelů patří k historicky nejstarším a tedy dodnes nejpoužívanějším typem kabelu pro vn, s kterým se můžeme do dnes setkat na celém území ČR. V současnosti se vzhledem ke špatné odolnosti vůči vlhkosti, k nákladné a složité konstrukci včetně vlastní pokládky nepoužívá. Bohužel výměna všech těchto kabelů s papírovou izolací napuštěnou olejem by byla ekonomicky nákladná a tak se moderní diagnostika stále musí zaměřovat i na tento typ kabelů. I přes to se v některých zemích stále vyrábějí s obchodním označením PILC (Paper Insulated Lead Covered Cables). Na *obr. 1* vidíme moderní vn kabel s papírovou izolací, kde vodiče jsou izolovány papírem napuštěným olejem a celý svazek izolovaných vodičů je navíc umístěn v olovněném plášti pro zamezení vniknutí vlhkosti. Navíc může být ještě vnější plášť z PVC jako ochrana olovněného pláště proti korozi.



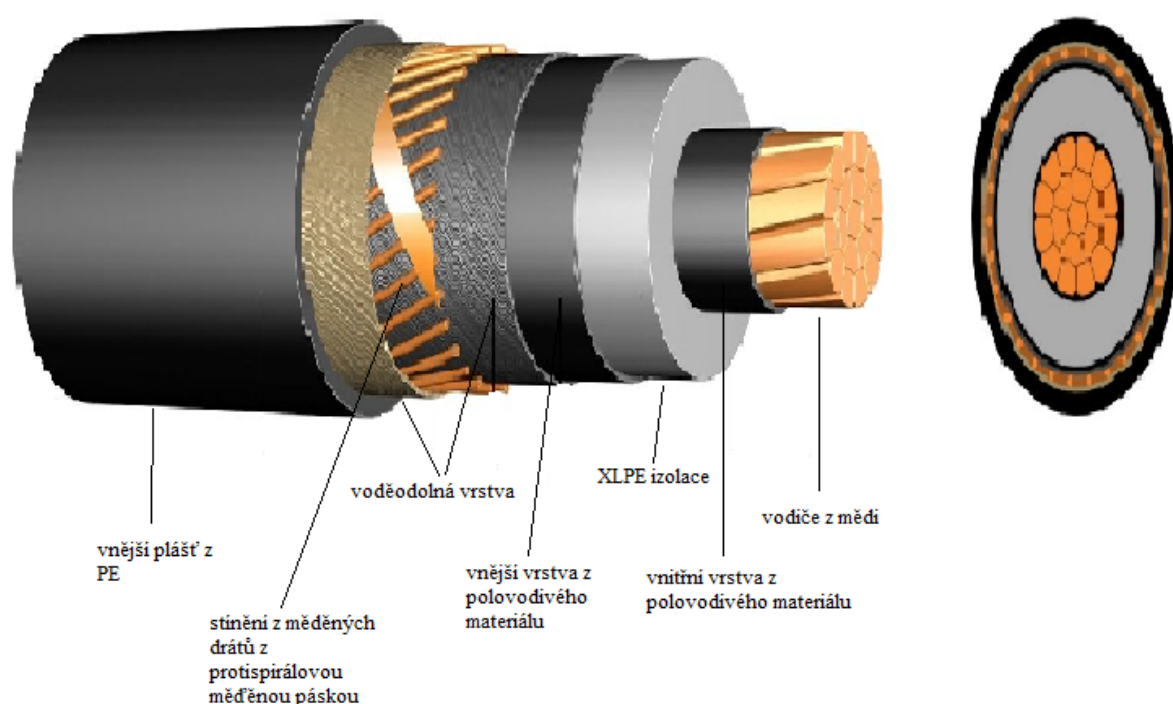
Obr.12. Vn kabel s izolací papír olej [9].

1.3.2 Kabel s PVC izolací

Nová technologie v polovině 20.stol., která vedla k rozvoji termoplastů umožnila tento materiál využít i v oblasti elektrotechniky jako izolační materiál. PVC (polyvinylchlorid) se hojně využívá i v oblasti vn, avšak vzhledem k větším dielektrickým ztrátám a k velkým sklonům k degradaci izolačních vlastností při vyšších teplotách se používá jen do 10 kV.

1.3.3 Kabel s PE a XLPE izolací

V polovině 20. stol. se začali používat i tzv. celoplastové izolační materiály. Nejprve to byl PE (polyetylen) a později byl tento materiál modifikován a vznikl zesítněný polyetylen XLPE s ještě lepšími izolačními vlastnostmi a především menšími dielektrickými ztrátami. Na obr.2 je zobrazen dnes již nejmodernější typ kabelu s XLPE izolací, který nahrazuje dnes již zastaralé kabely s papírovou izolací.



Obr.13. N2XS(F)2Y (6 / 10 kV) – vn kabel s XLPE izolací a vnějším pláštěm z PE.

V současnosti je na trhu nespočet typů vn kabelů. Každý izolační materiál má své výhody i nevýhody a je jen na provozovateli sítě jakým vlastnostem dá přednost. Následující přehled shrnuje výhody a nevýhody používaných izolačních materiálů u vn kabelů [10].

Izolační materiál	Výhody	Nevýhody
Papír olej	Nepoškozuje se ss zkouškami, nízké střední dielektrické ztráty, vzhledem k historii používání je známá vysoká spolehlivost	Vysoké pořizovací náklady, vysoká hmotnost, vyžaduje hydraulický tlak pro čerpání izolační kapaliny, těžko opravitelné, špatná odolnost proti vlhkosti
PVC	Levné pořizovací náklady, Odolné vůči vnějším vlivům (vlhkost, UV záření,...), běžně dostupné	Nejvyšší dielektrické ztráty, obsahuje halogeny, není příliš vhodné pro vn kabely, při vysokých teplotách se taví
EPR	Zvýšená ohebnost, v porovnání s XLPE menší tepelná roztažnost, nízká citlivost na vodní stromečky	Střední vysoké dielektrické ztráty, vyžaduje anorganické plnivo
PE	Nejnižší dielektrické ztráty, vysoká počáteční dielektrická pevnost	Vysoká citlivost na vodní stromečky, při vysokých teplotách dochází k rychlé degradaci materiálu
XLPE	Nízké dielektrické ztráty, materiál se netaví jen dochází k teplotní roztažnosti	Střední citlivost na vodní stromečky (existují však takové modifikace XLPE, které jsou odolné proti vodním stromečkům)

2. Degradální procesy izolace vn kabelů

Kabely určené pro rozvod elektrické energie pro střídavé napěťové hladiny od 1000 V do 52 kV nebo li vysoké napětí označováno zkratkou V_n musí splňovat ty nejpřísnější požadavky co se týče bezpečnosti a spolehlivosti provozu. Nejrizikovějším místem je tedy elektrický izolant. Izolant je látka teoreticky nevodivá neobsahující volné částice s elektrickým nábojem [3]. Tuto definici však splňuje pouze ideální izolant, Ve skutečnosti se v materiálech, používající jako elektrický izolant, vyskytují nejrozličnější fyzikální jevy, jako např. absorpční a resorpční proudy, polarizace, plazivé proudy a v neposlední řadě také částečné výboje [4]. K rozvodu el. energie se již před sto lety používaly silové kabely a koncem 1. sv. války to byly především měděné žíly izolované nejrozličnějšími vlákninami, kde postupem času se vyzkoušely nejrozličnější materiály pro izolaci jako vlna, bavlna, juta, přírodní či umělé hedvábí, tkaniny a papír. Tyto materiály však extrémně podléhávaly vnějším přírodním vlivům a to zejména vlhkosti, proto se napouštěly např. voskovými či asfaltovými hmotami. Po 1. sv. válce se začaly vyrábět silové kabely plněné olejem. Po 2. sv. válce se postupně všechny izolace silových kabelů nahrazovaly plastovými a v současné době se vyrábějí celoplastové silové kabely s nejčastější izolací ze zesíťovaného polyetylenu pro napětí až do 500 kV [5]. Tento materiál je velice odolný vůči vlhkosti a také má vysokou elektrickou pevnost, avšak jako každá nová technologie sebou přináší i nové problémy, kterými jsou zejména dutinky uvnitř izolace, kde při napětí V_n se nevyhne výskytu vnitřních částečných výbojů, či fenoménu nazývaným elektrický stromeček.

2.1 Vliv částečných výbojů na izolaci

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.1 na stárnutí izolace mají v současnosti při používání plastových materiálů největší vliv právě opakovaná aktivita vnitřních částečných výbojů. Stárnutí izolace lze definovat jako proces, kdy se mění chemická a fyzická vnitřní struktura izolantu tak, že se postupně mění elektrické vlastnosti daného izolačního materiálu. Tou nejdůležitější elektrickou vlastností je bezesporu elektrická pevnost, která je definována jako podíl průrazného napětí a tloušťky izolantu. Pro silové kabely V_n se tedy v současné době nejčastěji používají izolace z vysokomolekulárních plastů jako je polyetylen (značka PE), polytetrafluoretylen (značka PTFE, známý jako teflon) a zesíťovaný polyetylen (značka XLPE). Tyto materiály jsou však velmi citlivé na účinky vnitřních částečných výbojů a můžeme je podle [1] rozdělit do tří skupin:

Tepelné účinky:

V podstatě máme dva druhy mechanismů elektrického průrazu v pevném izolantu. Čistě elektrický a tepelný průraz, který je daný určitou mezní hladinou napětí tepelného průrazu. Tato mezní hladina napětí se mění se změnami dielektrických ztrát, které se exponenciálně mění s teplotou, tudíž lokální častý výskyt vnitřních částečných výbojů vede k lokální zvýšení teploty, což má za následek snížení mezní hladiny napětí tepelného průrazu a může tedy zde dojít k elektrickému průrazu.

Chemické účinky:

V dutince izolantu vlivem částečných výbojů dochází k řadám chemických reakcí, které mají za následek vznik nových kapalných, plyných či pevných produktů, které výrazně zrychlují degradační procesy v izolaci.

Bylo zjištěno, že kapalně produkty mohou vzniknout jen za přítomnosti kyslíku, vodíku a uhlíku. Chemickým rozбором bylo zjištěno, že se jedná o organické sloučeniny např. kyselina octová (chemická značka CH_3COOH) či kyselina mravenčí (chem. znač. HCOOH). Tyto organické

sloučeniny tak tvoří jakousi elektrolytickou vrstvičku na stěnách dutinky, která tak zvyšuje povrchovou vodivost až o 7 řádů [6].

Další experimenty zjistily, že působením částečných výbojů na již vzniklé kapénky dochází k jejich krystalizaci a vytvářejí se tak pevné produkty, např. krystaly hydrátu kyseliny šťavelové. Tyto krystaly vedou k lokálnímu zvýšení aktivity částečných výbojů, kde se časem vytvoří prohlubně, v kterých začíná růst tzv. elektrického stroměčku viz. *kap. 2.2*.

V dutinkách, kde se vyskytuje kyslík, pak částečné výboje vytvářejí ozon, jenž má nepříznivé oxidační účinky. Ozon spolu s oxidy dusíku pak mohou za určité vysoké teploty vytvořit i velmi agresivní kyselinu dusičnou. Při výbojích však dochází i v určitých typech izolantů k rozkladu stěn dutinek a tyto produkty dále mohou difundovat a vytvářet tak vodivější oblasti v pevném izolantu.

Elektro erozivní účinky:

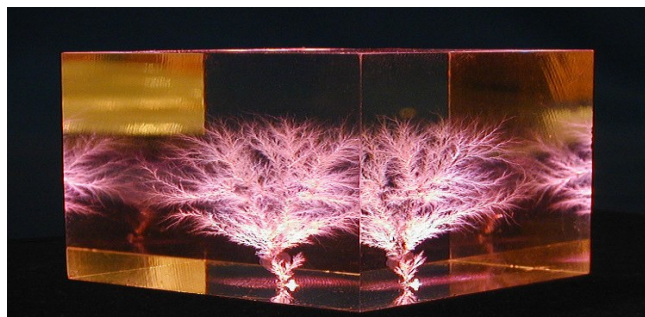
Vlivem výbojů jsou stěny dutinek vystaveny bombardování ionty a elektrony, což vede k erozi stěn dutinky. Eroze tak způsobuje zvětšování objemu dutinky a tento degradační proces může také vést až k elektrickému průrazu izolantu.

2.2 Elektrický stroměček

V elektrotechnice se také někdy používá anglický název **treeing**, přesněji tedy **electrical treeing**. V důsledku vnitřních částečných výbojů uvnitř izolantu z vysokomolekulárních plastů (polyethylen, zesíťný polyethylen, atd.), kde je vysoká intenzita el. pole, dochází k zvláštnímu jevu, kdy se vytvářejí elektricky vodivé kanálky, které svým růstem a tvarem připomínají právě stromovitý útvar v 3D viz *obr. 1*. Někdy se také kanálky tvoří a větví jen po povrchu izolantu, kde je tento povrch vystaven vysoké intenzitě elektrického pole nebo je znečištěn prachem popřípadě solí v okolí moře, pak tento vzniklý stroměček je spíše 2D viz *obr. 2* [6]. Tyto kanálky mohou být duté vyplněné plynem či kapalinou, která zde difunduje z okolního prostředí nebo zde vznikne nějakou chemickou reakcí. Tyto vodivé kanálky nakonec způsobí snížení el. pevnosti izolantu v daném místě a i při jmenovitém zatížení může dojít k průrazu. Podle charakteru růstu a tvaru rozeznáváme nejrozumnější stroměčky například může jít o jednoduchou větev, nejrozumnější tvary keře, či typy připomínající ostrý hroty, struny a nejčastěji se vyskytující tzv. motýlkové stromy a větrací stromy.

Motýlkové stromy (angl. **bow tie trees**) jsou typické svým symetrickým růstem od elektrody. Začnou růst uvnitř izolace a jelikož nemají volný přístup k vzduchu, který by podporoval částečné výboje, je jejich růst nespojitý a obvykle nepřemostí celou část izolace a tedy nedojde k průrazu.

Větrací stromy (angl. **vented trees**) vznikají na rozhraní elektrody a izolace a pokračují směrem k opačné elektrodě. Tyto stromy mají volný přístup k vzduchu, jenž podporuje plynulý růst až nakonec přemostí celou část izolace a dojde k průrazu.



Obr.14. 3D elektrický strom uvnitř polymethylmetakrylátové (PMMA) kostky.[6]



Obr.15. 2D zuhelnatělé elektrické stromy na povrchu desky z polykarbonátu.[6]

2.3 Vodní stromeček

V_n kabely pro distribuci el. energie jsou převážně umístěny pod zemí dle normy. Zde jsou však vystaveny jednomu z přírodních živlů a to vodě. Celoplastové kabely s izolací z organických polymerních materiálů (XLPE, PE, PER) obsahují již z výroby mnoho prázdných dutinek nebo mohou být na povrchu snadno poškozeny při pokládce. Pokud jsou dlouhodobě vystaveny přímému styku s vodou a současně jsou namáhány provozním napětím o vysoké intenzitě nastává jev zvaný růst vodních stromečků (z angl. water treeing). Tento proces probíhající uvnitř izolace má za následek zkrácení životnosti nebo-li dochází v průběhu let k poklesu dielektrických vlastností. Obsah vody či vodních par v izolaci ještě neznamená nutně nebezpečný stav. Pokud není vodní stromeček natolik rozvinutý, že by došlo k elektrickému průrazu, může takovýto kabelový úsek být v provozu i několik let. Vážný problém nastává tehdy, dojde-li vlivem extrémních podmínek (zvýšení teploty, chemické reakce atd.) k vysušení vodních kanálků. Vodní stromeček rázem přechází v elektrický stromeček, kde vlivem částečných výbojů se urychluje růst až dojde k elektrickému průrazu viz kapitola 2.2 (Elektrický stromeček).

Z předcházejícího odstavce vyplývá, že v kanálkách vyplněné vodou nevznikají částečné výboje. Diagnostické metody založené na analýze částečných výbojů by tedy zde mohly vyhodnotit kabelový úsek, značně zestárlý a prorostlý vodními stromečky, jako vyhovující. Z toho vyplývá, že tyto metody nelze aplikovat jako jediné a rozhodující pro vyhodnocení kvality izolace v_n kabelů.

Mnoho zkušebních a vědeckých institucí, zabývajících se diagnostikou izolačních systémů, se snažilo odhalit míru vodních stromečků a jejich negativní vliv na dielektrické vlastnosti celoplastových kabelů. Po mnoha testech došli k závěru, že vhodnou diagnostickou metodou je VLF měření ztrátového činitele ($\tan\delta$) nebo také měření polarizačního stejnosměrného proudu. Obě tyto metody dokázaly prokazatelně odhalit zestárlou kabelovou izolaci prorostlou vodními stromečky.

3. Měření částečných výbojů

Definice částečného výboje, druhy a jejich vlastnosti jsou nám již známy z předchozích kapitol. Nyní tedy přejdeme k vlastním metodám měření částečných výbojů. Ačkoli je částečný výboj ve své podstatě elektrický výboj charakterizovaný především velikostí elektrického náboje, nejsme omezeni pouze na metody detekující elektrické veličiny jako jsou proudové impulsy. Existuje i řada neelektrických veličin, které spolehlivě odhalují výskyt částečných výbojů a míru jejich účinků na izolační systém. Patří k nim vysokofrekvenční magnetické pole, teplota vyzařovaná do okolí, světelný projev ve viditelném ale i v ultrafialovém spektru, chemické výpary a zvukové vlny jak ve slyšitelném tak v ultrazvukovém pásmu. Všechny tyto projevy částečných výbojů jsou s dnešní moderní diagnostickou technikou snadno detekovatelné.

3.1 Elektrické metody

Tyto metody vhodným způsobem měří proudové impulsy, které jsou generovány aktivitou částečných výbojů. Je tedy potřeba mít vhodný snímač a pak už jen vyhodnocovací zařízení parametrů proudových impulsů, které nám odhalí míru účinků částečných výbojů.

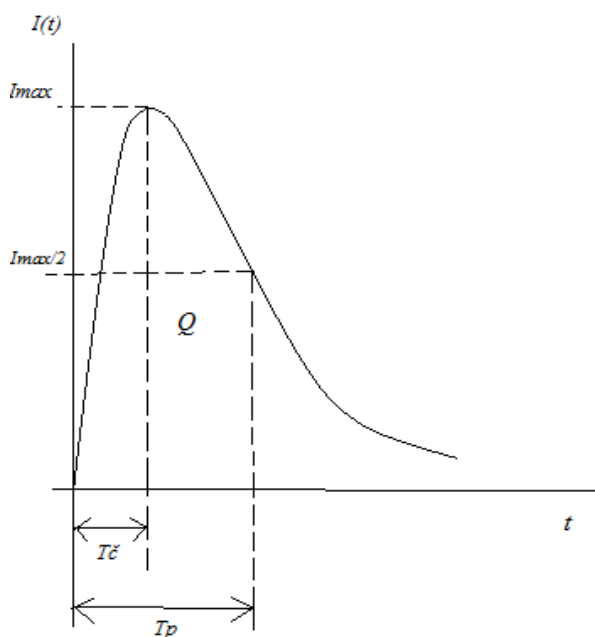
3.1.1 Přímé metody galvanická metoda

Při vzniku částečného výboje v dutince izolačního systému vlivem indukčnosti napájecího obvodu poklesne napětí na svorkách zkoušeného objektu. Proudový impuls vyvolaný výbojem je tedy vyrovnávacím proudem v obvodu, který na měřicí impedanci vyvolá napěťovou odezvu. Tato napěťová odezva je tedy ekvivalentní proudovému impulsu a jelikož je superponována na střídavé napájecí napětí je třeba jej odfiltrovat vhodným filtrem.

Na *obr. 1* je zobrazen tvar proudového impulsu částečného výboje, který je charakterizován maximální hodnotou proudu I_{\max} , dobou čela T_c a dobou půltýlu T_p . Tyto doby se u pevných izolačních materiálů pohybují v řádech ns a u kapalných izolačních materiálů v řádech μs . Velikost náboje je pak dána plochou ohraničenou touto křivkou a platí:

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (11)$$

Měřicí impedance bývá nejčastěji RLC článek, který je opatřen ochranou proti přepětí a také slouží jako výše uvedený filtr k odfiltrování napájecí frekvence.



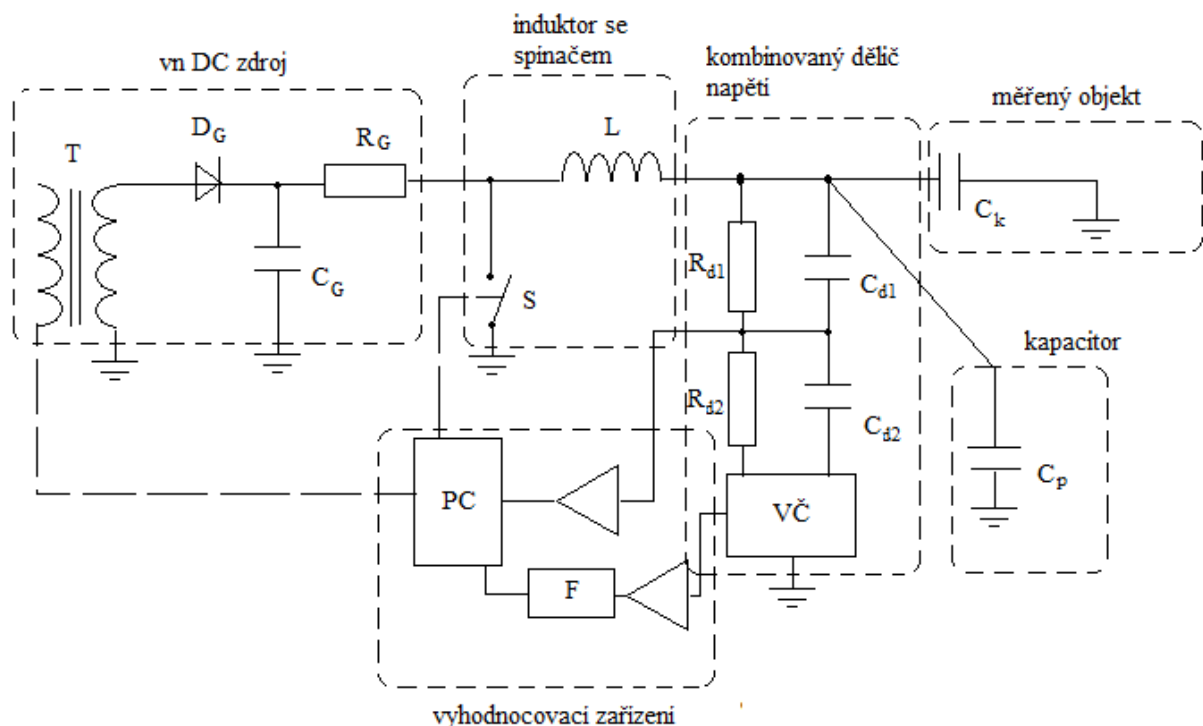
Obr.16. Proudový impuls částečného výboje

Výhoda této metody je, že patří do kategorie on line diagnostiky. Dále je výhodné možnost nastavení maximální citlivosti měření pomocí správně nastavené vazební kapacity v měřeném objektu. Velkou nevýhodou je však citlivost na rušivé vlivy (elektromagnetické vlny, rušení samotnými prvky v obvodu).

3.1.2 Metoda oscilačním napětím OWTS

OWTS (z angl. the oscillating wave test system) je zkratka pro moderní diagnostický systém, který na základě oscilačního napětí detekuje vzniklé impulsy vyvolané částečnými výboji. Z velikosti el. náboje a četnosti impulsů jsme schopni vyhodnotit stav kabelové izolace a zvláště potom kabelových souborů (spojky, koncovky) z hlediska výskytu částečných výbojů a s nimi spojenými degradačními procesy.

Princip systému OWTS spočívá ve vytvoření sériového rezonančního obvodu. Elektrický kabel si můžeme představit vzhledem k obvodovým parametrům jako kapacitu. Základní částí OWTS systému je induktor o velké indukčnosti, aby oscilační frekvence se co nejvíce podobala průmyslovému kmitočtu 50 Hz a tedy provoznímu namáhání [8]. Měřený kabelový úsek nejprve nabijeme DC proudem na předepsané zkušební napětí (U_0 , $1,2U_0$, $1,7U_0$ nebo $2U_0$) a poté spínacím prvkem vytvoříme rezonanční obvod. Obvod tvořený induktorem a kapacitou (měřený kabelový úsek) se rozkmitá vlastním kmitočtem a kabelovým úsekem se tak šíří oscilační vlny, které jsou postupně tlumeny (vlivem el. odporu vodiče a svodovými proudy). Celý systém je zapojen přes kombinovaný dělič napětí (odporový kapacitní) k vyhodnocovací jednotce (PC) a vhodným softwarem provedeme diagnostiku. Principiální schéma vidíme na obr.17.



Obr.17. Schéma měření metodou OWTS.

T – transformátor

D_G – výkonová dioda

R_G – vlastní el. odpor zdroje

C_G – vlastní kapacita zdroje

L – indukčnost

S – spínač

R_{d1} , R_{d2} – el. odpory kombinovaného děliče napětí

C_{d1} , C_{d2} – kapacity komb. děliče napětí

C_p – kapacita přídavného kondenzátoru

C_k – kapacita měřeného objektu (vn kabel)

F – filtr

PC – osobní počítač s monitorem (nebo notebook)

VČ – vazební člen

Na obr.17 vidíme, že je možno připojit paralelně k měřenému objektu kondenzátor, který se připojuje např. v případě že je měřený kabelový úsek příliš krátký a představuje tak malou kapacitu. Dnešní moderní OWTS systémy představují velice kompaktní zařízení, kde induktor spolu se spínačem a potřeným napěťovým děličem s elektronikou pro úpravu signálu tvoří jeden velký zapouzdřený celek. Díky takto lehce přenosnému celému měřicímu systému, kde stačí pouze připojit jakékoliv PC (dnes již existují i OWTS systémy s wifi přenosem) s vhodným nainstalovaným softwarem, se stává tato metoda v posledních letech velice populární. Jelikož částečné výboje nevznikají ve vodních kanálkách, nejmodernější systémy OWTS myslí i na tuto nevýhodu a jejich součástí bývá i integrální zkouška (měření $\text{tg}\delta$).

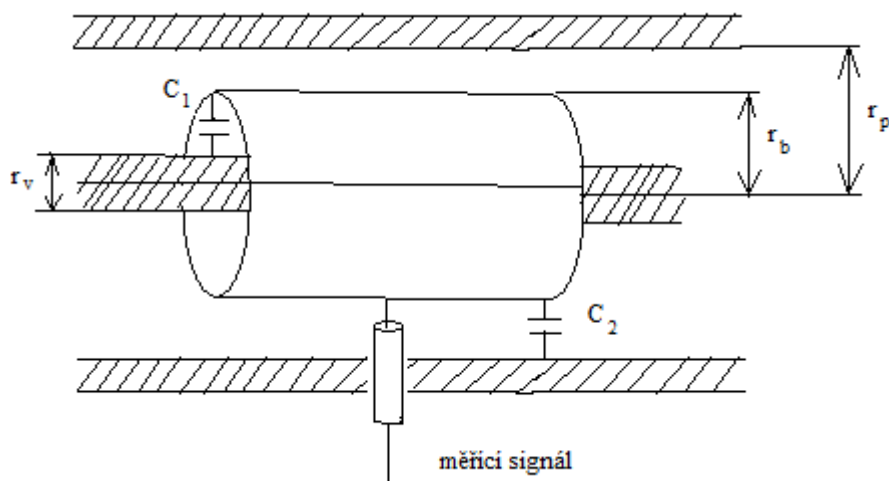
OWTS systém má navíc tu výhodu, že díky známé rychlosti šíření oscilační vlny, umíme určit délku kabelového měřeného úseku a spolehlivě lokalizovat zdrojové místo částečných výbojů. V tomto případě ale nejde o klasickou lokalizační metodu, jelikož víme s určitostí jen na kolikátém metru kabelového úseku dochází k výbojům. Pokud nevíme kudy přesně vede trasa kabelového vedení v zemi, musíme použít další vhodnou lokalizační metodu, nejčastěji akustickou. Celá diagnostika se tak může velice časově prodloužit.

3.1.3 Nepřímé metody – kapacitní snímač

Obecně nepřímé metody využívají toho, že projevem částečných výbojů je elektromagnetické pole, které můžeme vhodným snímačem detekovat. Tyto metody jsou hodně rozšířené v technické diagnostice elektrických točivých strojů jako např. induktivně vázané sondy, či diferenciální magnetické sondy k lokalizaci částečných výbojů v drážkách. Zde je tedy uvedena jen metoda kapacitního snímače koaxiálního tvaru (*obr. 1*), která se používá pro detekci výbojové činnosti v kabelech a zvláště na kabelových souborech (kabelové spojky a koncovky). Nevýhodou je nutnost přerušení silového obvodu při montáži této sondy a neodhalení stíněných zdrojů částečných výbojů. Pro kapacity na *obr. 1* platí:

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l / \ln(r_b / r_v) \quad (12)$$

$$C_2 = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l / \ln(r_p / r_b) \quad (13)$$



Obr. 18. Koaxiální kapacitní sonda [7].

3.2 Neelektrické metody

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, částečné výboje jsou projevem i mnoha neelektrických jevů, jenž můžeme spolehlivě detekovat. Patří k nim především světelné záření, tepelný ohřev, zvukové vlny, chemické zplodiny. Na základě detekce takových projevů jsme schopni vyhodnotit míru účinků částečných výbojů a v neposlední řadě lokalizovat přesné místo výbojové činnosti. Vzhledem k rozmanitosti neelektrických projevů používáme jako detektory a s nimi spojené vyhodnocení měření nejrůznější měřicí zařízení jako jsou směrové mikrofony, plynová chromatografie, termovize atd.

3.2.1 Optické měření

Elektrické výboje a tedy i částečné výboje jsou zdrojem i světelného záření v širokém spektru. Ve viditelném spektru jsou pozorovatelné již pouhým lidským okem a lze je zaznamenat klasickými fotoaparáty či kamerami. Takto vyzařovaná energie ve viditelném spektru je typická pro vnější částečné výboje (koróna). Vnitřní částečné výboje vznikající v izolantech kabelů, navíc převážně uložených v zemi, již nelze pozorovat pouhým okem. Zde však jejich dlouhodobá aktivita zanechává viditelné stopy poškození, které lze v laboratořích a zkušebnách dále analyzovat a prohlubovat tak znalosti o vlivu částečných výbojů na izolační systém.

Spíše než viditelné spektrum je pro výboje typické vyzařování energie v ultrafialové oblasti. Pro toto spektrum používáme kamery ve spojení s UV senzorem, které dokážou zachytit i slabé UV záření a převést jej na vhodné zobrazovací medium.

Další možné infračervené spektrum, které lze detekovat, souvisí s tepelným ohřevem okolí. Jako bezkontaktní měřicí systém teploty používáme termovizi. Jde o nejmodernější snímací přístroje, které tepelné pole převádí na zobrazovací displej. Na základě obrazu tepelného pole jsme pak schopni určit okamžitou teplotu jakéhokoli bodu z obrazu. Vykazuje li např. kabelová koncovka lokální přehřátí, můžeme s velkou přesností říct, že v ní probíhají částečné výboje a je nutné ji vyměnit.

3.2.2 Akustické měření

Výboj v plynném prostředí vyvolá změnu tlaku, který se šíří od místa vzniku ve formě akustických vln všemi směry. Jedná se o typickou lokalizační metodu. Po zjištění výbojové činnosti v kabelu např. globální galvanickou metodou musíme zdrojové místo částečných výbojů lokalizovat. Jako lokalizační detektor se nejčastěji používá směrový mikrofón. Nemusíme se jen omezit na slyšitelné pásmo a někdy je výhodnější snímat v ultrazvukovém pásmu, jedná se zejména o průmyslové haly s vysokými akustickými tlaky v provozu, kde by bylo velice obtížné rozlišit jednotlivé akustické projevy.

3.2.3 Chemické měření

Z kapitoly 2.1 vyplývá i další možnost detekce výbojové činnosti na základě chemických produktů, jenž vzniknou. Tato metoda je však pro praktické použití na kabelech zcela nemožná a setkáme se s ní spíše u točivých strojů a dalších elektrických přístrojů, kde izolantem je olej či plyn. Chemické rozboru vniklých produktů v dutinkách kabelové izolace, která se již musela v provozu vyměnit, jsou pak účinným nástrojem pro rozvíjení teorie o částečných výbojích a jejich degradační účinky na izolaci.

3.3 Praktické měření s měřicím vozem

V současnosti je jedním z největších provozovatelů regionálních distribučních sítí v ČR společnost ČEZ Distribuce. Jako držitel licence na distribuci má povinnost zajistit spolehlivý přenos el. energie. Vhodným nástrojem jak toho docílit je bezesporu technická diagnostika. O Základních pojmech, metodách a hlavně významu částečných výbojů v diagnostice izolačních systémů pojednávají předcházející kapitoly. Jak tedy vypadá taková současná diagnostika izolačních systémů v praxi u jednoho z největších provozovatelů el. sítí v ČR si ukážeme nyní.

3.3.1 Měřicí vůz

Distribuční síť tvoří nespočet el. zařízení (transformátorů, vypínačů, jističích prvků atd.) a v neposlední řadě kabelové vedení umístěné převážně v zemi. Základem diagnostiky izolačního systému kabelového vedení je mobilní diagnostické zařízení. K tomu slouží tzv. měřicí vozy. Současné vozy společnosti ČEZ Distribuce služby s.r.o určené pro diagnostiku kabelového vedení jsou vybaveny těma nejmodernějšími měřicími přístroji k provedení on site (on line či off line) diagnostiky. Ukázku měřicího vozu disponujícího OWTS systémem vidíme na *obr.20.*

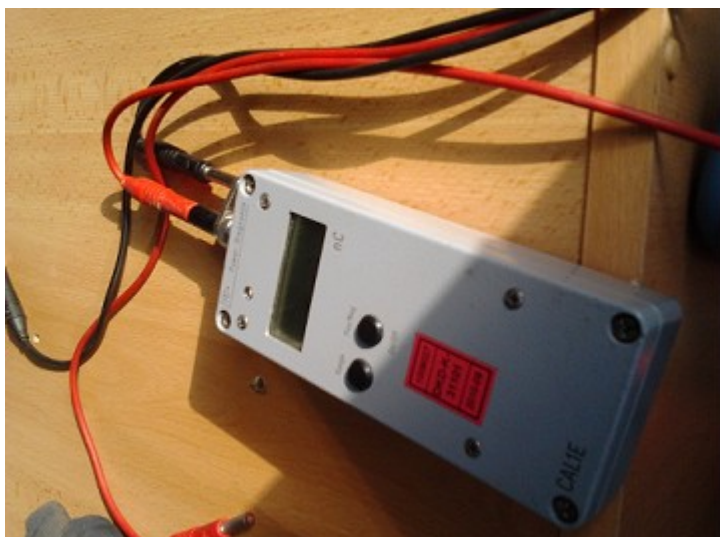
3.3.2 Diagnostika kabelových vedení vn – cizí zavinění poruchy

Toto měření je běžným příkladem výjezdu měřicího vozu, kdy došlo k poškození vn kabelu při výkopových pracích. Poškození bylo na tolik vážné, že všechny tři fáze se musely v daném místě zaspojovat. Kabelová spojka se musí vždy zkonstruovat dle přesných pokynů výrobce. Nedodržení pracovního postupu vede většinou vždy k výraznému zkrácení životnosti celého spoje. Zde se po zkušenostech prokázala diagnostika založená na detekci částečných výbojů velice užitečnou. Vadnou spojku výbojová aktivita lehce odhalí a tak se v současnosti při nově instalovaných spojkách vždy provede diagnostika.

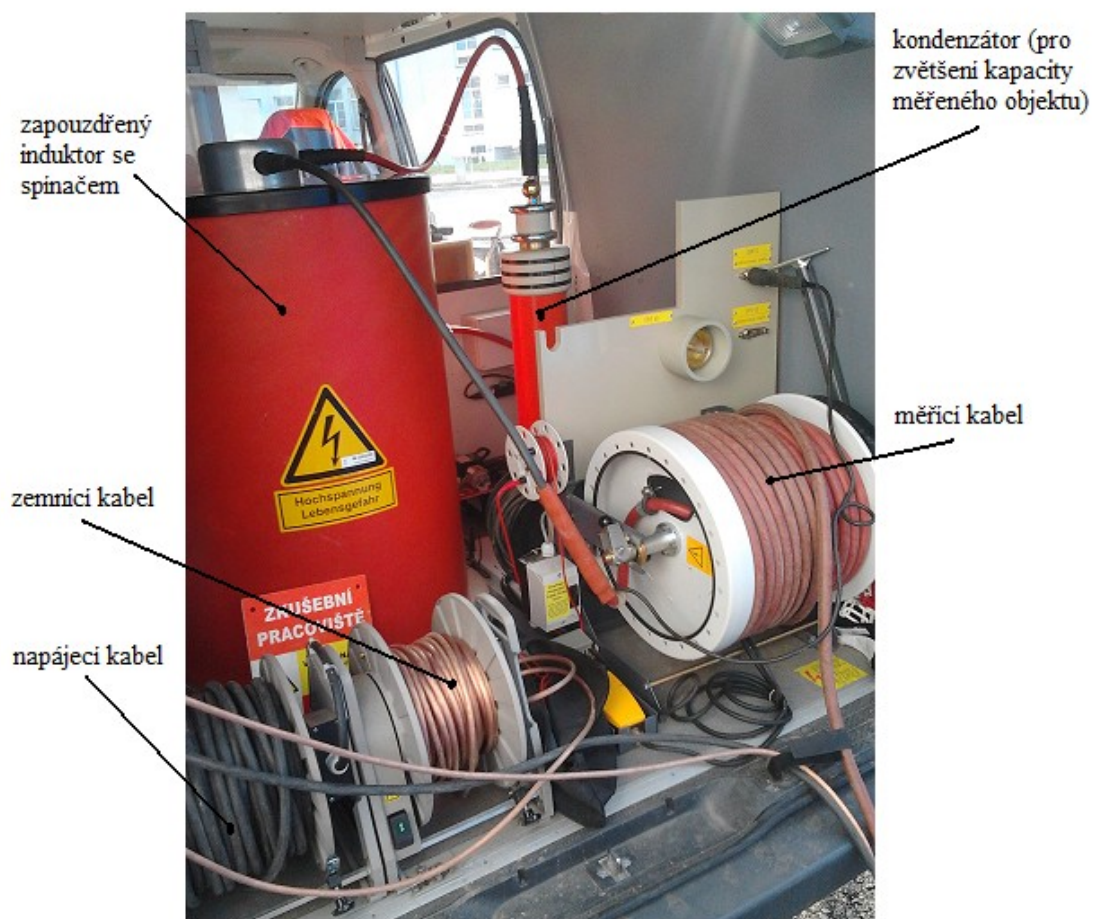
Postup měření:

Při každém zahájení diagnostiky kabelového vedení se založí tzv. měřicí karta. Tato karta obsahuje základní popis kabelového úseku (napětíová hladina, délka, typ kabelu, místo začátku a konce) pro možnost budoucího zpracování naměřených dat.

Po zapojení měřicího obvodu se musí nejprve provést kalibrace. Při kalibraci měřicího přístroje se zjišťují některé specifické vlastnosti měřeného objektu vzhledem k jeho parametrům (šíření impulsu v (m/s) a z toho vyplývající délku měřeného úseku l (m)). Kalibrační přístroj postupně generuje do testovaného objektu pravoúhlé pulzy o známém elektrickém náboji q . Jako zdroj pravoúhlých pulzů se používá přenosný bateriový generátor (*obr.19*).



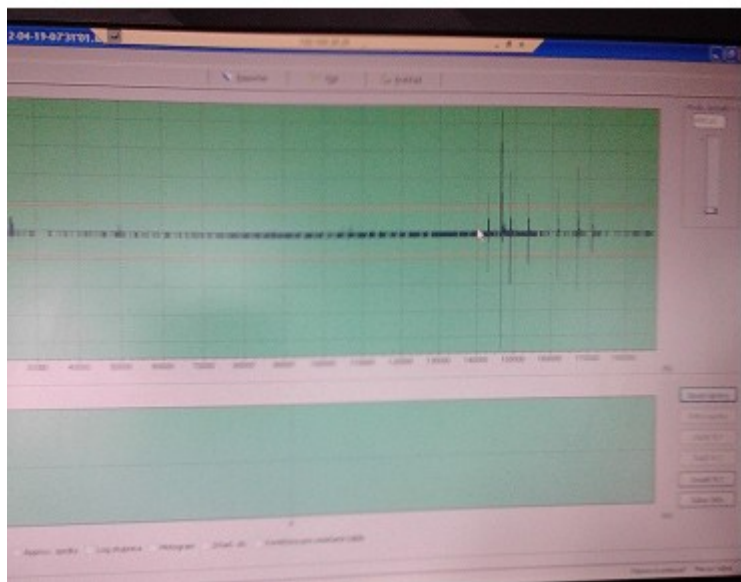
Obr.19. Kalibrační přístroj systému OWTS.



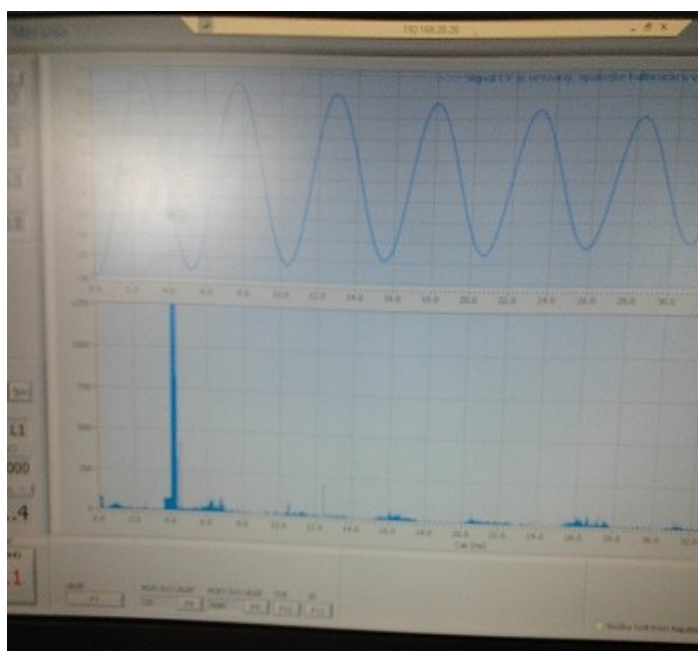
Obr.20. OWTS systém zabudovaný v měřicím voze.

Po kalibraci se může přejít k vlastnímu měření. Vše se ovládá pomocí speciálního programového rozhraní OWTS nainstalovaného v počítači. Měřený objekt se nabije na požadované provozní napětí U_0 či jeho násobek a diagnostický technik provede analýzu zobrazeného oscilačního průběhu (obr.22) a vzniklých impulzů vyvolaných částečnými výboji (obr.21)

Ukázka naměřených průběhů:



Obr.21. Impulzy vyvolané částečnými výboji ve fázi L1.





Obr.22. Oscilační napěťová vlna (nahore). PDIV (dole) zapalovací napětí výboje.

Vyhodnocení:

Z *obr.21* je evidentní jediný impulz. Tento impulz vznikl v místě ve vzdálenosti jen pár metrů od začátku měřicího obvodu, můžeme tedy tento výboj přisoudit nedokonalému spoji měřicího kabelu a měřené fáze. Na *obr.22* vidíme průběh oscilační napěťové vlny, která je postupně tlumená a pod ní velikost zapalovacího napětí, při které dané výboje vznikly. Na celém měřeném úseku ($l = 492$ m) nedošlo k žádným podezřelým výbojům a dle kritérií hodnocení lokální diagnostiky částečných výbojů systémem OWTS (*obr.23*) tato fáze vyhověla. Stejně měření se provedlo pro všechny tři fáze. Výstupní protokol takové diagnostiky vidíme na *obr.24*.

koncentrované výboje na koncovech (hodnota a četnost výbojů)	koncentrované výboje ve spojkách, v izolaci (hodnota a četnost výbojů)	rozložené výboje úseky (mimo konců) hodnota a četnost výbojů)	hodnocení stavu		doporučení
			číselně	Slovní	
Kabelová vedení s XLPE izolací nová (zkušební napětí 1,7U ₀)					
< 800pC n < 8	< 500pC n < 10	< 500pC n < 10	1	Bez závady	další kontrola dle garance (8 let)
800 2000 pC n > 8	500 800pC n > 10	500 1000pC n > 10	3	Možná závada	doporučená kontrola (min. po měsíci)
> 2000pC n > 10	> 800pC n >> 10	> 1000pC n >> 10	4	Závada	opravit
Kabelová vedení s XLPE izolací v provozu (zkušební napětí U ₀)					
< 1000pC n < 10	< 600pC n < 10	< 800pC n < 10	1	Bez závady	další kontrola dle garance (8 let)
1000 2000pC n < 10	600 1000pC n < 10	800 1500pC n < 10	2	Možná závada	doporučená kontrola (za 4 roky)
> 2000pC n > 10	1000 1500pC n > 10	1500 2000pC n > 10	3	Rozvíjící se závada	doporučená kontrola (do 2 let)
kladný výsledek diagnostiky koncovek	> 1500pC n >> 10	> 2000pC n >> 10	4	Vážná závada	výměna kabel. úseku, oprava spojky
Kabelová vedení s izolací olej/papír v provozu (zkušební napětí U ₀)					
< 3000pC n < 10	< 5000pC n < 10	< 5000pC n < 15	1	Bez závady	další kontrola dle garance (8 let)
3000 10000pC n < 10	5000 12000pC n < 15	5000 12000pC n < 15	2	Možná závada	doporučená kontrola (za 4 roky)
> 10000pC n > 10	> 12000pC n > 15	> 12000pC n >15	3	Rozvíjející se závada	doporučená kontrola (do 2 let)
kladný výsledek diagnostiky koncovek	> 12000pC n >> 15	> 12000pC n >> 15	4	Vážná závada	výměna kabel. úseku, oprava spojky

Obr.23. Kritéria hodnocení systémem OWTS.

	Oddělení Diagnostika kabelů ČEZ Distribuční služby, s.r.o.	 Zkušebna E31 Člen asociace zkušeben vn		
Diagnostika kabelových vedení vn				
Číslo protokolu	Datum	Čas	Teplota okolí (°C)	Rel.vlhkost (%)
	19.4.2012	11.00	15	54

Vlastník	Lokalita	Číslo vedení	Délka kabelu	Průřez kabelu
	Ostrava	1858	492 m	240 mm ²
Místo měření (začátek kabelu)	Ukončení kabelu	Typ kabelu		Jmenovité napětí U_N (kV)
OS 9184	OS 9507	PE		22

Provozní stav diagnostikovaného zařízení	Přeložka
--	----------

Základní údaje k měření: Požité přístroje: OWTS -60 M

Výsledky měření				
Metoda	Výsledek (L1,L2,L3)			
	Zkušební napětí	Naměřené hodnoty	Hodnocení	Kategorie
Zkrácená napěťová zkouška OWTS	2 U ₀	- -	Vyhověl	-
Napěťová zkouška - plášťová zkouška	5 kV DC	0,01 mA	Vyhověl	-
Diagnostika částečných výbojů	2 U ₀	300 pC	Vyhověl	1
-	-	-	-	-

Hodnocení :		
Kabelové vedení diagnostickým zkouškám vyhovělo a je schopno provozu dle ČDS_ME_0029r00	Jméno	
	Podpis	

Obr.24. Výstupní protokol o provedené diagnostice na kabelech vn.

Závěr

Při zpracování této bakalářské práce jsem se držel striktně zadanými okruhy dané problematiky týkající se obecně diagnostiky izolačních systémů a zvláště pak diagnostiky částečných výbojů na kabelovém vedení ČEZ.

V prvním bodě jsem se seznámil se současnou technickou diagnostikou izolačních systémů, se základními pojmy a vlastnostmi izolačních systémů. Jednotlivé výhody a nevýhody jednotlivých metod vedou stále k závěru, že v současnosti neexistuje univerzální metoda, která by je dokázala nahradit. V praxi se tedy stále využívá kombinace nejvhodnějších metod pro zjištění stavu dané izolace. K univerzálnosti mají však nejbližší právě metody, které využívají částečné výboje. Dokážou s velkou přesností určit nejslabší místo kabelového úseku, v kterém by mohl nastat v nejbližší době elektrický průraz a dojít tak k rozsáhlejším škodám. Využívání diagnostiky částečných výbojů se tedy stalo neodmyslitelnou součástí současné technické diagnostiky izolačních systémů včetně kabelového vedení vn.

V druhém bodě, abych mohl pochopit význam částečných výbojů na kabelovém vedení jsem se musel seznámit z teorií částečných výbojů a jejich negativnímu vlivu na izolační systém. Degradací procesy uvnitř izolace vždy úzce souvisí s projevy částečných výbojů. Technologie výroby izolačních materiálů se snaží nalézt stále dokonalejší a odolnější materiály. Největším problémem u celoplastových materiálů však stále zůstávají dutinky, které při vystavení vysoké elektrické intenzitě jsou zdrojem částečných výbojů.

Ve třetím bodě jsem se pak zaměřil na praktické měření částečných výbojů. Dle druhu částečných výbojů (vnitřní, povrchové, vnější) se používá řada nejrůznějších metod. Pro kabelové vedení vn, které se převážně nachází v zemi je v současnosti u Distribuční služby ČEZ nepoužívanější systém OWTS doplněn o integrální zkoušku (měření $tg\delta$). V severomoravském regionu mají s touto metodou už zkušenosti od roku 1998 a i do budoucna se jeví jako nejefektivnější nástroj pro odhalení zestárlé izolace, či vadné spojky, popřípadě jiných poruch, které vedou k aktivitě částečných výbojů. S měřením se systémem OWTS jsem se osobně seznámil v praxi při běžné kontrole kabelového vedení vn po namontování spojek. Diagnostický technik sám potvrdil po dlouholetých zkušenostech, že tento systém vždy spolehlivě odhalil rozvíjející se poruchu a mohla tak za včasu proběhnout výměna vadné spojky či kabelového úseku.

Výsledkem celé mé práce je tak potvrzení, že veškeré výzkumné práce a jiná odborná literatura na téma diagnostika částečných výbojů je stále více aktuální. A dalo by se říct, že se dnešní moderní technická diagnostika kabelového vedení neobejde bez diagnostiky částečných výbojů.

Seznam použité literatury

- [1] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1.vyd. Praha: Academia, 2005. 140 s. ISBN 80 200 1358 X.
- [2] MACH, Věslav. *Technika vysokého napětí*. 2. přepracované vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2006. 111 s. ISBN 80 248 1161 8
- [3] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_izolant
- [4] <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/285/285069.pdf>
- [5] http://is.muni.cz/th/174120/pedf_b/Bakalarska_prace_Kabelove_technologie_navrh.txt
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing
- [7] MENTLÍK, Václav. PIHERA, Josef. POLANSKÝ, Radek. PROSR, Pavel. TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978 80 7300 232 9
- [8] MEDEK, Petr, *Diplomová práce Diagnostika kabelových vedení vn a systém hodnocení zpracování, uchování a využití naměřených výsledků v SME*. VŠB TU Ostrava, 2005
- [9] <http://www.ru.all.biz/cs/g1105723/>
- [10] http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Cable_Insulation_Materials